



⑯ BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENT- UND  
MARKENAMT

⑯ ⑫ Offenlegungsschrift  
⑯ ⑯ DE 198 24 744 A 1

⑯ Int. Cl. 6:  
G 01 N 27/62

⑯ ⑯ Aktenzeichen: 198 24 744.3  
⑯ ⑯ Anmeldetag: 3. 6. 98  
⑯ ⑯ Offenlegungstag: 18. 3. 99

Mit Einverständnis des Anmelders offengelegte Anmeldung gemäß § 31 Abs. 2 Ziffer 1 PatG

⑯ ⑯ Anmelder:

Schmidt-Ott, Andreas, Prof. Dr., 40882 Ratingen, DE

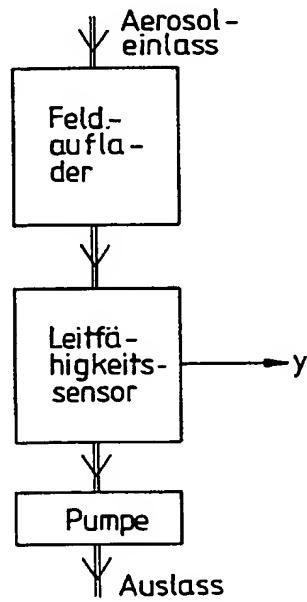
⑯ ⑯ Erfinder:

gleich Anmelder

**Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen**

⑯ ⑯ Vorrichtung zur Messung des Staubgehalts in Gasen

⑯ ⑯ Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung zur Messung der gasgetragenen Partikelmasse pro Einheit des Gasvolumens in einem Aerosol. Zu diesem Zweck wird, gemäß der Abb. 3 das Gas-Partikelgemisch (Aerosol) durch einen Feldauflader geführt, in welchem die Partikel unter einer hohen elektrischen Feldstärke durch Anlagerung von Ionen elektrisch aufgeladen werden. Hinter dem Auflader durchströmt das Aerosol eine Vorrichtung, in welcher eine Größe proportional zu seiner Leitfähigkeit bestimmt wird. Unter der Bedingung der Feldaufladung ist diese proportional zur Partikelkonzentration und zur dritten Potenz des Partikeldurchmessers. Damit wird durch die Vorrichtung ein Wert bestimmt, der durch Eichung als Partikelmasse pro Volumeneinheit normiert werden kann. Eine Pumpe saugt das Aerosol durch die oben genannten Komponenten.



## Beschreibung

## Einleitung

5      Aerosole, d. h. Gemische aus Gasen und Partikeln spielen eine wesentliche Rolle in der Atmosphäre, der Atemluft und in vielen technischen Prozessen. Die Partikel werden oft als Schwebstaub oder Schwebeteilchen bezeichnet. Eine wichtige Aufgabe besteht darin, die Konzentration der Partikel meßtechnisch zu erfassen. Bisherige Normen und Richtlinien geben die Partikelkonzentration meist in Form der Partikelmasse pro Volumeneinheit des Aerosols, beispielsweise in Mikrogramm pro Kubikmeter an. Die so angegebene Partikelbeladung atmosphärischer Luft erfaßt praktisch nur Partikel, die größer sind als ca. 0,1 Mikrometer, da die kleineren, die zwar in hoher Anzahlkonzentration auftreten können, massenmäßig nicht ins Gewicht fallen. Gasgetragene Partikel können eine Größe bis zu 100 Mikrometer aufweisen. Partikel dieser Größe sinken jedoch schnell nach unten und haben daher keine große Aufenthaltsdauer im Gas. In der Luftüberwachung werden meist nur Partikel berücksichtigt, die kleiner als 10 Mikrometer (PM 10) bzw. kleiner als 2,5 Mikrometer (PM 2,5) sind.

15

## Stand der Technik

In konventionellen Vorrichtungen wird die Partikelmasse pro Volumeneinheit eines Gases durch Herausfiltern des Partikelanteils und gravimetrische Bestimmung der Masse ermittelt. Das Beta-Staubmeter bestimmt die Staubbeladung der Umgebungsluft über die Abschwächung von Betastrahlung beim Durchgang durch eine Schicht abgeschiedener Partikel (E.S. Marcias, R.B. Husar, in "Fine Particles", B.Y.H. Liu (Herausgeber), Academic Press, New York, 1976). Dieses Funktionsprinzip ermöglicht eine quasikontinuierliche Bestimmung der Partikelmasse pro Volumen, d. h. es liefert typischerweise Meßwerte im Abstand einiger Minuten. Ein direktes Maß für die Partikelmassenbeladung der Luft liefern ferner Geräte, bei denen durch Partikelabscheidung auf eine schwingende Oberfläche die Schwingungsfrequenz verändert wird. Hierzu sei ein auf dem Prinzip der Schwingquarzwaage funktionierendes Gerät (D.A. Lundgren in "Fine Particles" B.Y.H. Liu (Herausgeber), Academic Press, New York, 1976), genannt, bei dem der Schwingkörper ein Quarzplättchen ist. Bei einem anderen Gerät, dem TEOM (Tapered Element Oszillating Microbalance) (H. Patashnik, US Patent No. 3,926,271 (1975)) ist der Schwingkörper ein einseitig eingespannter dünner konischer Quarzkörper. Schwingkörpergeräte weisen Nachteile in der Reproduzierbarkeit der Herstellung des Schwingkörpers oder der Abhängigkeit des Signals von Einflußgrößen wie der Temperatur und der Luftfeuchte auf. Ferner ist die Massenproportionalität bei Überschreitung einer von den Partikeleigenschaften abhängigen Grenzbeladung des Schwingkörpers nicht mehr gewährleistet. Das Reinigen oder Auswechseln des Schwingkörpers ist notwendig. Zudem sind die Ansprechzeiten relativ lang und liegen typischerweise oberhalb von einer Minute.

Eine Vorrichtung von Whitby (K.T. Whitby, U.S. Patent No. 3,526,828 (1970)) ist demgegenüber mit kurzer Ansprechzeit zu realisieren. Sie beinhaltet wie die Vorrichtung der vorliegenden Erfindung im kontinuierlichen Aerosol durchfluß die Schritte der Partikelaufladung durch Ionenanlagerung und die Messung eines elektrischen partikelladungs-abhängigen Signals. Im Folgenden ist es kurz beschrieben und von der vorliegenden Erfindung abgegrenzt. Das Aerosol durchströmt in der Whitby'schen Vorrichtung eine Aufladungszone, in welcher die Luft mit Ionen angereichert wird, von denen sich einige an Partikel anlagern. Während für die Erzeugung der Ionen eine hohe elektrische Feldstärke benötigt wird, geschieht die Ionenanlagerung in einem niedrigen elektrischen Wechselfeld mit einer Amplitude < 1000 V/cm. So dann durchströmt das Aerosol eine Trennstufe, in welcher ein schwaches statisches elektrisches Feld Partikel kleiner als 0,05 Mikrometer beseitigt. Die nach dieser Konditionierung verbleibenden Partikel werden gesammelt und ihre Ladung wird gemessen. Die pro Zeiteinheit gemessene elektrische Ladung (d. h. der elektrische Strom) wird als proportionales Maß für die Partikelmasse pro Volumeneinheit des Gases angegeben. Wie aus der Offenbarung der Whitby'schen Vorrichtung (K.T. Whitby, U.S. Patent No. 3,526,828 (1970)) hervorgeht, ist diese Proportionalität aber nur dann erfüllt, wenn die Partikelgrößenverteilung eine sog. selbsterhaltende (self preserving) Verteilung ist. Die Aerosolforschung der letzten Jahrzehnte hat allerdings gezeigt, daß diese Voraussetzung in den meisten praktischen Fällen nicht erfüllt ist. Dies ist ein Grund dafür, daß sich die einfach zu realisierende Whitby'sche Vorrichtung gegen einige der oben genannten komplizierteren, insbesondere das Beta-Staubmeter, nicht durchzusetzen vermochte.

50     Die vorliegende erfundungsgemäße Vorrichtung ist ebenso einfach wie die Whitby'sche und weist eine ebenso kurze Ansprechzeit von einigen Sekunden auf, liefert aber unabhängig von der Partikelgrößenverteilung ein massenproportionales Meßsignal. Ein grundlegender Unterschied besteht im Aufladungsvorgang: Die Ionenanlagerung geschieht in der vorliegenden erfundungsgemäßen Vorrichtung unter einem starken elektrischen Feld (> 1000 V/cm). Ein weiterer grundlegender Unterschied besteht in der Messung des partikelladungsabhängigen Signals: In der Whitby'schen Vorrichtung werden die (also alle) geladenen Partikel, die sich nach der Partikelkonditionierung im Gasstrom befinden gesammelt, und der aus der Gesamtheit dieser Partikel gebildete elektrische Strom ist das Sensorsignal. In der erfundungsgemäßen Vorrichtung wird dagegen eine zur Leitfähigkeit des Aerosols proportionale Größe bestimmt. Das gemessene Signal ist dann proportional zur Partikelkonzentration, zur Partikelladung und zur elektrischen Beweglichkeit der Partikel. Demgegenüber ist das Signal in der Whitby'schen Vorrichtung ausschließlich proportional zur Partikelkonzentration und -ladung.

## Grundlagen

65     Die erfundungsgemäße Vorrichtung besteht im Wesentlichen aus einer Kombination der Ionenanlagerung an die gasgetragenen Partikel im hohen elektrischen Feld (> 1000 V/cm), mit einer Messung einer zur Leitfähigkeit des resultierenden Aerosols proportionalen Werts. Die Ionenanlagerung unter Feldstärken > 1000 V/cm wird hier als Feldaufladung bezeichnet. In der Literatur findet man vielfach den Begriff Diffusions-Feldaufladung für diesen Aufladungsmechanismus.

# DE 198 24 744 A 1

Mit der elektrischen Ladung  $q$  geladene gasgetragene Partikel bewegen sich durch die Wirkung eines elektrischen Feldes der Feldstärke  $E$  mit der Geschwindigkeit

$$v_d = Z \cdot E \quad (1).$$

Diese Gleichung definiert die elektrische Beweglichkeit  $Z$  der Partikel. Für annähernd kugelförmige Partikel des Durchmessers  $D_p$  gilt das Stokes'sche Gesetz

$$Z = q \cdot C_c / (3\pi\eta D_p) \quad (2).$$

Hierin bedeuten  $q$  die Partikelladung,  $\eta$  die Gasviskosität,  $D_p$  den Partikeldurchmesser und  $C_c$  die Cunningham-Korrektur, die für Partikel größer als 0.1 nm einen Wert in der Nähe von 1 aufweist (W.C. Hinds, *Aerosol Technology*, Wiley, N.Y. (1982)). Für die meisten Anwendungen der vorliegenden Erfindung ergibt  $C_c = 1$  eine genügender Genauigkeit. Ein Aerosol, welches Partikel der mittleren elektrischen Beweglichkeit  $\bar{Z}$  und der mittleren Ladung  $q$  in der Konzentration  $N$  enthält, besitzt eine elektrische Leitfähigkeit  $\sigma$  gemäß

$$\sigma = \bar{q} \cdot N \cdot \bar{Z} \quad (3).$$

Hierbei wird vorausgesetzt, daß für den Transport des elektrischen Stromes ausschließlich geladene Partikel und keine Ionen (geladene Moleküle oder Atome) zur Verfügung stehen.  $\sigma$  kann beispielsweise wie in der Abb. 4 mit 2 parallelen als ebene Platten ausgebildeten Elektroden, zwischen denen sich das Aerosol befindet, gemessen werden. Bei einer an die Platten angelegten Spannung  $U$ , einem Plattenabstand  $d$  und einer Plattenfläche  $A_p$  ergibt sich die Leitfähigkeit  $U$  aus dem gemessenen Strom  $I$  gemäß

$$I = U \cdot \sigma \cdot A/d \quad (4).$$

Wenn die beiden Elektroden nicht als parallele Platten sondern als beliebige Anordnung elektrischer Leiter ausgeprägt sind, gilt der Zusammenhang

$$I = U \sigma \cdot C_{geo} \quad (5)$$

wobei die sich die Konstante  $C_{geo}$  über das Ohm'sche Gesetz  $j = \sigma \cdot E$  ( $j$ : Stromdichte,  $E$ : elektrische Feldstärke) und über die Gesetze der Elektrostatik für jede beliebige Leiteranordnung numerisch bestimmen läßt. Alternativ dazu läßt sich  $C_{geo}$  durch eine Eichung bestimmen. Zu diesem Zweck wird die Leitfähigkeit  $U$  eines Aerosols mit bekannter Partikelladung  $q$ , bekannter elektrischer Beweglichkeit  $Z$  und bekannter Partikelkonzentration  $N$  bestimmt, wodurch sich  $C_{geo}$  über die Gleichungen (3) und (5) aus dem gemessenen Strom  $I$  und der angelegten Spannung  $U$  ergibt. Eine geeignete Methode zur Herstellung eines bezüglich der oben genannten Größen gut definierten Prüfaerosols entspricht dem Stand der Technik und ist beispielsweise bei B.Y.H. Liu, D.Y.H. Pui, J. Colloid Interface Sci. 47, 155-171, 1994 beschrieben.

Bei der Durchführung einer Leitfähigkeitsmessung im Aerosol ist zu beachten, daß die durch das elektrische Feld bewegten Partikel teilweise an der Elektrode der entgegengesetzten Polarität abgeschieden werden. Damit tritt eine Ladungsträgerverarmung auf, d. h. die Anzahl geladener Partikel zwischen den Elektroden wird verringert und die Leitfähigkeit unerwünschterweise durch die Mesung verfälscht. Eine korrekte Messung der Leitfähigkeit eines Aerosols kann durch die folgende, dem Stand der Technik entsprechende Maßnahme (A. Schmidt-Ott, H.C. Siegmann, Appl. Phys. Lett. 32, 710 (1978)) erreicht werden:

Die Spannung  $U$  wird durch eine Wechselspannung  $U(t) = U_0 \sin(2\pi ft)$  der Frequenz  $f$  ersetzt. Die Ladungsträgerverarmung durch Abscheidung an Elektroden wird dadurch stark herabgesetzt. Der resultierende Strom ist dann eine Überlagerung des Ohm'schen Anteils  $I_R = GU_0 \sin(2\pi ft)$  und des Kapazitiven Anteils  $I_C = 2\pi f C U_0 \cos(2\pi ft)$ . Zur Ermittlung von  $G$  muß die Stromamplitude  $GU_0$ , die in Phase mit der angelegten Spannung  $U(t)$  ist, mit einem phasenempfindlichen Verstärker gemessen werden.

In der erfindungsgemäßen Vorrichtung erhalten die Partikel durch die Anlagerung von Ionen ihre elektrische Ladung. Zu diesem Zweck werden Ionen durch eine Korona-Entladung an einem Emitter, der als Spitze oder als dünner Draht ausgebildet ist, dadurch erzeugt, daß der Emitter sich auf einer hohen elektrischen Spannung gegenüber umgebenden leitenden Oberflächen, z. B. dem Gehäuse, befindet. Typischerweise beträgt diese Spannung 3 bis 10 kV, wenn der mittlere Abstand des Emitters von den umgebenden leitenden Oberflächen zwischen einem und mehreren Zentimetern liegt. Die Ionen wandern vom Emitter zu den umgebenden leitenden Oberflächen. Die Polarität der Ionen entspricht der Polarität des Emitters. Partikel eines Aerosols, das mit Ionen durchflutet wird, die wie oben beschrieben erzeugt werden, werden durch Anlagerung von Ionen elektrisch aufgeladen. Auflader, die auf diesem Prinzip beruhen, wurden in der Literatur beschrieben, beispielsweise bei K.T. Whitby, US Patent 3,526,828, 1970, und A. Schmidt-Ott, P. Büscher, F. Jordan, Offenlegungsschrift DE 44 29 831 A1, Anmeldetag 23.4.94, sowie P. Büscher, A. Schmidt-Ott, A. Wiedensohler, J. Aerosol Science 25, 651 (1994). Die meisten Veröffentlichungen zu diesem Thema beziehen sich auf sog. Diffusionsauflader, die dadurch gekennzeichnet sind, daß die Aerosolpartikel in einem Bereich niedriger Feldstärke ( $< 1000 \text{ kV/cm}$ ) mit den Ionen zusammengebracht werden. Die vorliegende Erfindung beinhaltet dagegen ein Aufladungsverfahren, das Partikel und Ionen bei hoher Feldstärke ( $> 1000 \text{ V/cm}$ ) zusammenbringt. Der zugehörige Prozeß wird als Feldaufladung bezeichnet.

Durch Ionenanlagerung aufgeladene Partikel erhalten im statistischen Mittel eine Beweglichkeit  $\bar{Z}$ , die vom Partikeldurchmesser und dem Produkt aus der Ionenkonzentration und der Zeit abhängt, während der die Partikel den Ionen ausgesetzt sind (nt-Produkt). Die Abb. 1 zeigt den Zusammenhang  $\bar{Z}(D_p)$  für  $nt = 10^7 \text{ s/cm}^3$ . Für Partikelgrößen oberhalb von 100 nm ist der Zusammenhang  $\bar{Z}(D_p)$  außerdem im starken Maße von der elektrischen Feldstärke  $E_e$  in der Aufladungs-

zone abhängig. **Abb. 1** zeigt die Fälle  $E_c = 100$  V/cm (durchgezogene Kurve) und  $E_c = 5000$  V/cm (gestrichelte Kurve). Die durchgezogene Kurve entspricht dem Fall der Diffusionsaufladung (kleine Feldstärke), die gestrichelte einem Fall der Feldaufladung (große Feldstärke). Gemäß W.C. Hinds, *Aerosol Technology*, Wiley, N.Y. (1982) ist die mittlere Partikelladung für Feldaufladung und große Partikel

5

$$\bar{q} = 3\pi\epsilon\epsilon_0 D_p^2 E / (\epsilon + 2) \quad (6)$$

10

worin  $\epsilon$  die Dielektrizitätszahl des Partikelmaterials,  $\epsilon_0$  die Dielektrizitätskonstante und  $E_c$  die elektrische Feldstärke in der Aufladungszone bedeuten. Diese Gleichung ist umso besser erfüllt, je größer  $E_c$  ist. Für  $E_c = 10$  kV/cm gilt die Gl. (6) in guter Näherung oberhalb von 0.1 nm. Aus Gl. (6) und Gl. (2) folgt

$$\bar{Z}(D_p) \sim D_p \quad (7)$$

wie auch aus **Fig. 1** ersichtlich.

15

Ein Aufladungskonzept, das Feldaufladung ermöglicht, ist bereits bei P. Büscher, A. Schmidt-Ott, *J. Aerosol Sci.* 23, S. 385 (1992) beschrieben.

#### Funktionsweise der erfindungsgemäßen Vorrichtung

20

Die Partikelmasse  $m^*$  pro Volumeneinheit des Aerosols (die Massenkonzentration der Partikel) ist gleich dem Produkt aus der Dichte des Partikelmaterials  $\rho$ , dem Partikelvolumen  $1/6 \pi D_p^3$  und der Partikelkonzentration  $N$ :

$$m^* = \rho/6 \pi D_p^3 N \quad (8).$$

25

Aus den Gleichungen (2), (3), (6), (7) und (8) folgt:

$$\sigma = \left( \frac{2\epsilon}{\epsilon + 2} \epsilon_0 E_c \right)^2 \frac{2m^*}{\eta\rho} \quad (9)$$

30

Ein Aerosol, das unter hoher Feldstärke ( $E_c > 1000$  V/cm) durch Ionenanlagerung elektrisch aufgeladen wurde, weist demnach eine Leitfähigkeit auf, die zur Massenkonzentration der Partikel proportional ist. Aus den vorangegangenen Darlegungen ist selbstverständlich, daß dies ebenso gilt, wenn das Aerosol eine Verteilung von Partikelgrößen enthält. Die erfindungsgemäße Vorrichtung benutzt erstmals diese nach dem Wissen des Erfinders bisher unpublizierte Erkenntnis. Für eine Absolutbestimmung der Partikelmasse aufgrund von Gl. 9 muß die Partikeldichte  $\rho$  und die Dielektrizitätszahl  $\epsilon$  bekannt sein. Dies ist beispielsweise für viele industriell verarbeitete Stäube und Pulver der Fall sowie für Partikel in Abgasen. In der Messung der Partikelkonzentration der Umgebungsluft oder der Atmosphäre führt die Annahme  $\rho \approx 1$  g/cm<sup>3</sup> auf eine für die meisten Zwecke genügende Genauigkeit. Die Abhängigkeit von der Dielektrizitätszahl ist nur schwach, und  $\epsilon = 1$  liefert meist ein genügend genaues Resultat.

40

Das Blockschema in der **Abb. 3** zeigt den Aufbau der erfindungsgemäßen Vorrichtung zur Messung des Staubgehalts in Gasen. Das Aerosol, dessen Partikelmasse pro Volumeneinheit bestimmt werden soll, wird mit einer Pumpe kontinuierlich durch einen Feldauflader und nachfolgend einem Leitfähigkeitsensor zur Bestimmung einer zur Leitfähigkeit des Aerosols proportionalen Größe  $y$  gesogen. Diese Größe ist dann ein proportionales Maß für die Partikelmasse pro Volumeneinheit. Im Falle der als Beispiel oben angeführten Leitfähigkeitsmessung zwischen planparallelen Platten besteht über die Gleichungen (4) und (9) ein absoluter Zusammenhang zwischen der Partikelmasse pro Volumeneinheit  $m^*$  und der Ausgangsgröße  $y$ , die dem Strom  $I$  entspricht. Im allgemeinen Fall der erfindungsgemäßen Vorrichtung besteht mindestens eine angenäherte Proportionalität zwischen  $y$  und  $m^*$ , und der Proportionalitätsfaktor kann durch einen Eichvorgang ermittelt werden. Hierfür wird  $y$  mit der Anzeige einer absoluten Methode der Bestimmung der Staubmasse pro Volumeneinheit verglichen, beispielsweise eines Betastaubmeters (E.S. Marcias, R.B. Husar, in "Fine Particles", B.Y.H. Liu (Herausgeber), Academic Press, New York, 1976). Der erfindungsgemäße Vorrichtung und dem absolut anzeigende Gerät müssen zu diesem Zweck Teilströme desselben Aerosols zugeführt werden. Hierzu kann beispielsweise ein in der Partikelgröße variierbares Prüfaerosol nach B.Y.H. Liu, D.Y.H. Pui, *J. Colloid Interface Sci.* 47, 155–171, 1994 verwendet werden. Mit Vorteil wird für die Eichung ein Aerosol verwendet, das in der Partikelgröße und -Konzentration für das zu messende oder zu überwachende Aerosol typisch ist. Soll beispielsweise ein Stadtaerosol das Meßobjekt sein, so empfiehlt es sich, den Eichvorgang ebenfalls mit Stadtaerosol durchzuführen durch Vergleich der Anzeige eines absolutbestimmenden Geräts und dem Ausgang  $y$  der erfindungsgemäßen Vorrichtung über längere Zeit.

50

Für die Einwandfreie Funktion der Vorrichtung muß erfüllt sein, daß keine der im Prozeß der Aufladung vorhandenen Ionen in die Vorrichtung zur Messung der Aerosolleitfähigkeit gelangen. Dies geschieht in der Praxis von selbst dadurch, daß die Ionen spätestens in der Leitung zwischen Aufladung und Leitfähigkeitsmessung durch Diffusion an die inneren Wände dieser Leitung aus dem Gasstrom beseitigt werden. Die mathematische Beschreibung der Abscheidung von Ionen in Leitungen ist in der Aerosoltechnik bestens bekannt und in zahlreichen Büchern, z. B. W.C. Hinds, *Aerosol Technology*, Wiley, N.Y. (1982) zu finden. Die Leitung kann in ihrer Länge so ausgelegt sein, daß alle Ionen durch Diffusion an die Innenwand dieser Leitung verlorengehen. Aufgrund des im Vergleich zu Ionen wesentlich kleineren Diffusionskoeffizienten gehen auf diese Weise nur wenige Partikel verloren. Die Beseitigung der Ionen kann durch ein schwaches elektrisches Feld unterstützt werden. Dieses kann entweder statisch oder ein Wechselfeld sein.

60

Eine Ausführungsmöglichkeit des Leitfähigkeitsensors in der erfindungsgemäßen Vorrichtung ist in der **Abb. 4** skizziert. Das Aerosol durchfließt einen Kanal 41 mit rechteckigem Querschnitt, auf dessen oberer und unterer Seite die durch Isolierungsplatten 44 und 45 vom geerdeten Kanal 41 elektrisch getrennten parallelen metallischen Elek-

troden 42 und 43 angebracht sind. Die spannungsführende Elektrode 42 befindet sich auf einer Spannung U gegenüber Erde. Die Meßelektrode 43 ist über ein empfindliches Strommeßgerät, das elektrische Ströme im Bereich von etwa  $10^{-15}$  A messen kann, mit Erdpotential verbunden. Unter der oben genannten Voraussetzung, daß aufgrund des durch U erzeugten elektrischen Feldes  $E = U/d$  (d: Elektrodenabstand) nur ein kleiner Teil der im Aerosol enthaltenen Partikel aus dem Aerosol entfernt werden (z. B. < 10%), ist der gemessene Strom I über Gleichung 4 mit der Aerosoleitfähigkeit verknüpft und dient somit zu ihrer Bestimmung. In der Ausführungsmöglichkeit der Abb. 4 wird die Voraussetzung der Abscheidung nur eines kleinen Teils der Partikel dadurch erfüllt, daß die Strömungsgeschwindigkeit  $v_s$  so groß gewählt wird, daß in der Zeit  $t = L/v_s$  (L: Plattenbreite), während der sich jedes Partikel im Raum zwischen den Elektroden befindet, mit der Driftgeschwindigkeit  $v_d$  gemäß der Gleichung (1) nur eine im Vergleich zum Elektrodenabstand d kleine Auslenkung  $x = v_d t$  erfolgt. Die Bedingung für eine korrekte Leitfähigkeitsmessung heißt also

$$v_d L/v_s \ll d \quad (10).$$

Ist beispielsweise  $v_d L/v_s = d/10$ , so ergibt sich eine um etwa 10% fehlerhafte Leitfähigkeit. Für typische Anwendungen der erfundungsgemäßen Vorrichtung ist ein solcher Fehler tolerabel. Praktisch heißt dies, daß die Spannung U gegenüber der Strömungsgeschwindigkeit nicht zu hoch sein darf.

Die Abb. 5 zeigt eine andere Ausführungsmöglichkeit des Leitfähigkeitssensors. Die Elektroden 51 und 52 weisen hier wie der Kanal 53 eine zylindrische Form auf. Die rohrartig ausgeprägte Meßelektrode 51 ist über einen zylindrischen Isolator 54 mit dem Kanal 53 fest verbunden und elektrisch isoliert. Die stabförmige spannungsführende Elektrode 52 wird über zwei isolierende Stäbe 55 und 56 in Position gehalten. Der Stab 55 ist teilweise durchbohrt und dient als isolierende Durchführung für einen Draht, der die Mittelelektrode mit einer Spannungsquelle verbindet. Die für das Beispiel der Abb. 4 quantitativ formulierte Voraussetzung, daß nur ein kleiner Teil der Partikel abgeschieden werden darf, ließe sich für das Ausführungsbeispiel der Abb. 5 in ähnlicher Weise Ableiten. Eine andere Möglichkeit, einen Betriebszustand kleiner prozentualer Partikelabscheidung zu finden besteht darin, einen Generator für Prüfaerosole einzusetzen, das Aerosol mit einem Feldauflader aufzuladen und bei kontinuierlichem Durchfluß den Strom I in Abhängigkeit der Spannung U zu messen. Bei einer bestimmten Durchflußgeschwindigkeit tritt ab einer bestimmten Spannung Sättigung ein, d. h. der Strom steigt mit wachsender Spannung nicht weiter an. In diesem Zustand werden alle Partikel abgeschieden. Für den Betrieb des Leitfähigkeitssensors ist dann eine Spannung zu wählen, bei welcher der Strom nur einige Prozent, z. B. 10%, des Maximalstroms beträgt.

Eine weitere Ausführungsmöglichkeit des Leitfähigkeitssensors ist in der Abb. 6 skizziert. Hier sind die Elektroden als parallele Gitter ausgeführt, die senkrecht zur Strömung stehen und vom Aerosol durchströmt werden. Die Elektroden sind in isolierende Ringe 64 eingespannt, die das strömungsführende metallische geerdete Rohr 63 unterbrechen. Die Meßelektrode 61 befindet sich zwischen den spannungsführenden Gittern 62. Die Bedingung, daß nur ein kleiner Teil des Aerosols abgeschieden werden darf, läßt sich entsprechend den oben angegebenen Beispielen rechnerisch oder durch Messung ermitteln.

Ein von den oben beschriebenen Leitfähigkeitssensoren abweichendes Prinzip beruht auf der Erkenntnis, daß bei den oben beschriebenen Leitfähigkeitssensoren im stationären Zustand, d. h. bei gleichmäßiger Aerosoldurchfluß, der zur Leitfähigkeit proportionale Strom I gleich dem Strom der durch die Spannung U abgeschiedenen Partikelladung pro Zeiteinheit ist. Die Partikelladung, die im Aerosol verbleibt, wird entsprechend verringert. Eine zur Aerosoleitfähigkeit proportionale Größe erhält man also auch, wenn man durch ein elektrisches Feld einen geringen Anteil des Aerosols abscheidet und die entsprechende Verringerung  $\Delta I$  des gesamten, durch die geladenen Partikel im strömenden Aerosol getragenen elektrischen Stromes  $I_{ges}$  bestimmt. Hierzu kann ein Aerosolelektrometer (Bedienungsanleitung des 3068 Aerosol Electrometer, TSI Inc., St. Paul MN, USA) eingesetzt werden. Es besteht im Wesentlichen aus einem mechanischen Filter, der vom metallisch leitendem Material, das einen Faraday-Käfig bildet, umgeben ist. Die Partikel des den Filter durchströmenden Aerosols werden von diesem zurückgehalten und bleiben somit im Faraday-Käfig. Der vom Faraday-Käfig gegen Erde abfließende elektrische Strom wird gemessen und ist gleich dem elektrischen Partikelstrom  $I_{ges}$ . Die Abb. 7 zeigt eine Ausführungsmöglichkeit des Leitfähigkeitssensors nach dem voranstehend beschriebenen Prinzip. Nach Wissen des Erfinders wurde ein Leitfähigkeitssensor nach dem Prinzip wie in Abb. 7 bisher nirgends beschrieben. Das Aerosol strömt durch einen geerdeten strömungsführenden Kanal 71 an einer durch die Stäbe 73 isolierend gehaltenen Elektrode 72 vorbei, die alternierend auf eine Spannung U und auf Erdpotential gelegt wird. Dahinter durchströmt das Aerosol ein mechanisches Filter in einem Faradaykäfig 74, das zusammen mit einem empfindlichen Strommeßgerät ein Aerosolelektrometer bildet. Wenn die Spannung an der Elektrode 72 zwischen 0V und U variiert wird, entspricht dies einer Veränderung des gemessenen Stromes  $I_{ges}$  um  $\Delta I$ . Bei periodischem Ein- und Ausschalten der Spannung U ergibt sich eine Modulation des Stromes  $I_{ges}$  derselben Frequenz mit der Amplitude  $\Delta I$ , die zur Aerosoleitfähigkeit  $\sigma$  proportional ist. Die Meßaufgabe besteht also darin, den Anteil des Stromes  $I_{ges}$  zu bestimmen, der dieselbe Frequenz wie die Spannung an der Elektrode 72 hat und entsprechend der Laufzeit des Aerosols von der Elektrode 72 bis zum Faraday-Käfig 74 phasenverschoben ist. Dies ist eine Routineaufgabe in der Meßtechnik, die sich mit Hilfe von handelsüblichen phasenempfindlichen Lock-in-Verstärkern lösen läßt. Anstatt der in der Abb. 7 angedeuteten Rechteckspannung zwischen U und 0V kann auch eine mittelwertfreie Sinusspannung an die Elektrode angelegt werden. Auch dann ist die Amplitude der Modulation von  $I_{ges}$  proportional zur gesuchten Aerosoleitfähigkeit, wie sich leicht zeigen läßt. Das über den Kanal 71 geerdete Gitter 75 dient der Abschirmung des Aerosolelektrometers von dem durch die Wechselspannung verursachten Wechselfeld. Die vorangehend beschriebene Realisierung des Leitfähigkeitssensors hat den Vorteil hoher erzielbarer Empfindlichkeit durch Einsatz eines Lock-in-Verfahrens. Die Periodendauer der an die Elektrode 72 angelegten Spannung wird sinnvollerweise nicht wesentlich kleiner gewählt als die Zeit, die ein von der Strömung getragenes Partikel benötigt, um den Zwischenraum zwischen der Elektrode 72 und dem strömungsführenden Zylinder 71 zu passieren. Gegenüber den davor beschriebenen Möglichkeiten der Leitfähigkeitsmessung weist der in der Abb. 7 skizzierte Sensor den Vorteil auf, daß keine hochstabilisierte Spannung U erforderlich ist. Kleine Schwankungen dieser Spannung führen in der Realisierungsmöglichkeiten nach den Abb. 4, 5 und 6 zu influenzströmen in die Meßelektrode, die die Messung

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

stören und die Empfindlichkeit begrenzen.

Die Abb. 2 zeigt eine mögliche Ausführung des Feldaufasters, der sich nach Wissen des Erfinders von bisher bekannten durch die Anordnung der spannungsführenden Teile unterscheidet. Positive Ionen werden durch eine Koronaentladung an einem dünnen Draht 1 erzeugt, der entlang der Symmetriechse einer geerdeten leitenden Hülse verläuft, die als metallischer Zylinder 2 mit teilweise gitterartig ausgeprägter Wand 3 ausgeprägt ist. Der Draht liegt relativ zur Erde auf einer positiven elektrischen Hochspannung Spannung  $U_c$ , die durch eine entsprechende Quelle erzeugt wird. Die am Koronadraht erzeugten Ionen fließen teilweise auf den geerdeten Zylinder 2. Dieser wird am Gehäuse 6 mit Stangen 8 gehalten. Ein Außenzyylinder 4, der typischerweise einen gegenüber dem Zylinder 2 um 1 cm größeren Radius aufweist, ist mit dem Gehäuse 6 über einen elektrisch isolierenden Zylinder 7 verbunden. Der Außenzyylinder 4 ist an eine gegenüber Erde symmetrische hohe Wechselspannung angeschlossen. Die Amplitude dieser Spannung ist höher als 1000 V, so daß in der Zone zwischen dem Zylinder 2 und dem Außenzyylinder während der meisten Zeit eine Feldstärke über 1000 V/cm besteht. Hierbei ist der zeitliche Spannungsverlauf vorzugsweise rechteckförmig, kann beispielsweise aber auch sinusförmig sein. Während der negativen Halbwelle dieser Spannung werden positive Ionen durch das Gitter in den Raum zwischen den Zylindern 2 und 4 gezogen und durchqueren diesen Raum vollständig bis zum Außenzyylinder 4. Der ionendurchflutete Raum zwischen dem gitterartig ausgeprägten Teil 3 des Zylinders 2 und dem Außenzyylinder 4 wird Aufladezone genannt. Das die aufzuladenden Partikel enthaltende Aerosol wird durch die Aufladungszone geleitet, wo sich unter einer elektrischen Feldstärke, die mehr als 1000 V/cm beträgt, positive Ionen an Partikel anlagern. Auch die geladenen Partikel werden durch Wirkung des Wechselfeldes bewegt. Die Frequenz der Wechselspannung wird so hoch gewählt, daß die Partikel in jeder Halbperiode eine Auslenkung erfahren, die wesentlich kleiner ist als die Abmessungen der Aufladungszone. Da der Mittelwert der Wechselspannung null ist, werden die Partikel durch die Wirkung des Feldes nur in unwesentlichem Maße an den Zylindern 2 und 4 abgeschieden. Da die Ionen eine wesentlich höhere Beweglichkeit als die Partikel haben, existiert ein weiter Bereich anwendbarer Frequenzen, in dem die positiven Ionen fast während der Gesamtdauer jeder negativen Halbwelle den Aufladungsraum durchfluten. Das Aerosol wird in einer kontinuierlichen Strömung durch den Auflader durchgesogen.

Anstelle des Drahtes in der Abb. 2 kann auch eine Nadel verwendet werden, deren Spitze auf der Höhe des gitterartig durchbrochenen Stücks 3 liegt. Zur Erzeugung der Koronaentladung kann allgemein ein metallisches Teil verwendet werden, das an mindestens einer Stelle einen Krümmungsradius aufweist, der kleiner als 1/10 mm ist. Eine Nadel weist einen solchen kleinen Krümmungsradius an ihrer Spitze auf, ein dünner Draht entlang seiner gesamten Länge.

In Abb. 8 ist als wesentlichster Teil der erfindungsgemäßen Vorrichtung nach Abb. 3 eine mögliche Ausführung der Kombination eines Feldaufasters mit einem Leitfähigkeitssensor gezeigt. Der Auflader 81 entspricht im Wesentlichen dem in Abb. 2 dargestellten, wobei ein über den zylindrischen Kanal 83 geerdetes Gitter 82 sowohl der Halterung des Innenteils als auch der Abschirmung der Meßelektrode 85 von dem durch die Wechselspannung an der zylindrischen Elektrode 4 erzeugten elektrischen Feld dient. Die Meßelektrode des Leitfähigkeitssensors ist hier als Stab ausgebildet, der in den strömungsführenden Kanal 83 hineinragt. Die spannungsführende Elektrode 86 des Sensors ist hier eine sich dem zylindrischen Kanal 83 anpassende nur einen kleinen Teil des Umfangs bedeckende Platte, die durch den Isolator 87 von 83 isoliert ist. Der Anteil des von dieser Platte zum geerdeten Kanal 83 und zum geerdeten Gitter 82 verlaufenden elektrischen Feldes bewirkt die Abscheidung aller Ionen, bevor diese die Meßelektrode 85 erreichen können.

Wie aus den vorangehenden Abschnitten ersichtlich, gilt der proportionale Zusammenhang zwischen dem Ausgabewert der erfindungsgemäßen Vorrichtung und der Massenkonzentration  $m^*$  nur für Partikel, die größer als ca. 0,1 Mikrometer sind. Enthält das zu messende Aerosol eine hohe Konzentration kleinerer Partikel, so kann dadurch der Ausgabewert vergrößert werden, obwohl diese Partikel keinen nennenswerten Beitrag zur Massendichte  $m^*$  haben. Daher kann es von Vorteil sein, der erfindungsgemäßen Vorrichtung eine sog. Diffusionsbatterie (W.C. Hinds, *Aerosol Technology*, Wiley, N.Y. (1982)) voranzusetzen, durch die das Aerosol strömt, bevor es die erfindungsgemäße Vorrichtung durchströmt. Eine Diffusionsbatterie hat die Eigenschaft, vorzugsweise kleinere Partikel aus einem Aerosolstrom zu entfernen. Durch geeignete Dimensionierung der Diffusionsbatterie, die aus der genannten Referenz (Hinds) abzuleiten ist, werden im Wesentlichen Partikel, die kleiner als 0,1 Mikrometer sind, entfernt.

#### Patentansprüche

1. Vorrichtung zur Messung des Stabgehalts in Gasen, dadurch gekennzeichnet, daß die Vorrichtung aus einer gasdichten Anordnung zusammengesetzt ist, in welcher hintereinander ein Feldaufader, ein Leitfähigkeitssensor zur Bestimmung einer zur Aerosolleitfähigkeit proportionalen Größe  $y$  und eine Pumpe angeordnet sind, so daß die Pumpe das Aerosol in einer kontinuierlichen, gleichförmigen Strömung durch den Feldaufader und den Leitfähigkeitssensor saugt, wobei im Feldaufader die Anlagerung von Ionen an die Aerosolpartikel bei einer elektrischen Feldstärke geschieht, deren Absolutbetrag mindestens zeitweise höher ist als 1000 V/cm und wobei keine der im Feldaufader erzeugten Ionen den strömungsführenden Kanal zwischen Feldaufader und Leitfähigkeitssensor passieren können, da sie durch Diffusion und/oder elektrische Felder an Oberflächen abgeschieden werden.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der Leitfähigkeitssensor aus einem strömungsführenden Kanal besteht, in dessen Innerem sich eine vom strömungsführenden Kanal isolierte Meßelektrode und eine ebenfalls vom strömungsführenden Kanal isolierte spannungsführende Elektrode befinden, wobei die spannungsführende Elektrode an eine Konstantspannungsquelle und die Meßelektrode an ein empfindliches Strommeßgerät angeschlossen ist, wobei die Spannung nur so hoch eingestellt wird, daß der Strom weniger als etwa ein Zehntel seines bei Erhöhung der Spannung erreichten Maximalwerts erreicht, so daß der Strom annähernd proportional zur Leitfähigkeit des Aerosols ist.
3. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der Leitfähigkeitssensor aus einem strömungsführenden Kanal besteht, in dessen Innerem sich eine vom strömungsführenden Kanal isolierte spannungsführende Elektrode befindet, wobei die spannungsführende Elektrode an eine Wechselspannungsquelle angeschlossen ist, was dazu führt, daß in periodisch wechselndem Ausmaß ein klei-

# DE 198 24 744 A 1

ner Anteil der Partikel aus dem Aerosol beseitigt wird,  
daß sich von der spannungsführenden Elektrode stromabwärts ein Aerosolelektrometer befindet, das aus einem von  
einem Faraday-Käfig umgebenen Filter und einem Strommeßgerät besteht, wobei der Filter mit dem strömungsfüh-  
renden Rohr derart dicht verbunden ist, daß der gesamte Aerosolstrom vom Aerosolelektrometer erfaßt wird,  
und daß mit Hilfe eines phasenempfindlichen Verstärkers der Anteil des vom Aerosolelektrometer gemessenen  
elektrischen Stroms in seiner Amplitude bestimmt wird, der die Frequenz der von der oben genannten Wechselspan-  
nungsquelle erzeugten Wechselspannung hat und gegenüber dieser eine Phasenverschiebung aufweist, die gleich  
der Laufzeit des fließenden Aerosols von der spannungsführenden Elektrode bis zum oben genannten Filter des Ae-  
rosolelektrometers ist,  
so daß die oben genannte Amplitude proportional zur Leitfähigkeit des Aerosols ist. 10

4. Verfahren nach Anspruch 1, 2 oder 3, dadurch gekennzeichnet,  
daß der Feldauflader aus einem strömungsführenden Rohr zusammengesetzt ist, in dessen Innerem sich ein gegen  
das Rohr elektrisch isoliertes metallisches Teil befindet, das an mindestens einer Stelle einen Krümmungsradius  
kleiner als 1/10 mm aufweist und an eine Hochspannungsquelle angeschlossen ist, wodurch sich an diesem metal-  
lischen Teil eine Koronaentladung ausbildet,  
daß das oben genannte metallische Teil von einer geerdeten und stellenweise gitterartig durchbrochenen Hülse um-  
geben ist, durch die ein Teil der durch die Koronaentladung erzeugten Ionen in den Raum außerhalb der Hülse drin-  
gen können,  
daß sich außerhalb von der genannten Hülse eine Elektrode befindet, die an eine Wechselspannungsquelle ange-  
schlossen ist, die eine hohe Wechselspannung liefert, derart, daß sich zwischen dieser Elektrode und der genannten  
Hülse ein elektrisches Wechselfeld aufbaut, das zeitweise eine Feldstärke höher als 1000 V/cm aufweist,  
und daß mindestens ein Teil der Aerosolströmung durch den Zwischenraum zwischen der genannten Hülse und der  
genannten Elektrode fließt, wodurch sich unter hoher elektrischer Feldstärke Ionen an die Aerosolpartikel anlagern. 20

5. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2 oder 3 und 4, dadurch gekennzeichnet,  
daß der Feldauflader gemäß der Abb. 2 so aufgebaut ist, daß sich entlang der Achse eines zylindrischen teilweise  
gitterartig ausgeprägten geerdeten Rohrs 2 ein dünner Draht 1 befindet, der an eine Hochspannungsquelle ange-  
schlossen ist und an dem in Folge dessen eine Koronaentladung auftritt,  
daß das genannte teilweise gitterartig ausgeprägte Rohr 2 koaxial im Inneren eines strömungsführenden elektrisch  
leitenden Rohrs 6 mit Hilfe isolierender Teile an diesem befestigt ist,  
daß an der inneren Wand des genannten strömungsführenden Rohrs 6 über eine isolierende Schicht 7 eine zylinder-  
förmige Elektrode 4 angebracht ist, die sich gegenüber dem gitterartig durchbrochenen Teil 3 der Rohres 2 befindet,  
und die an eine Spannungsquelle angeschlossen ist, die eine hohe Wechselspannung gegenüber dem Erdpotential  
liefert, so daß das elektrische Feld zwischen der Elektrode 4 und dem geerdeten Zylinder 2 eine Amplitude aufweist,  
die größer ist als 1000 V/cm, und so daß der gesamte Aerosolstrom die Aufladungszone zwischen dem Rohr 4 und  
dem durchbrochenen Teil 3 der Elektrode 2 durchströmt, wo sich unter einem elektrischen Wechselfeld einer Am-  
plitude, die größer als 1000 V/cm ist, Ionen an die Aerosolpartikel anlagern. 30

6. Vorrichtung nach einem oder mehreren der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß eine Diffu-  
sionsbatterie derart mit dem Einlaß des Feldaufladers dicht verbunden wird, daß das Aerosol zuerst die Diffusions-  
batterie, dann den Feldauflader, dann den Leitfähigkeitssensor und dann die Pumpe durchfließt. 35

Hierzu 8 Seite(n) Zeichnungen

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

**- Leerseite -**

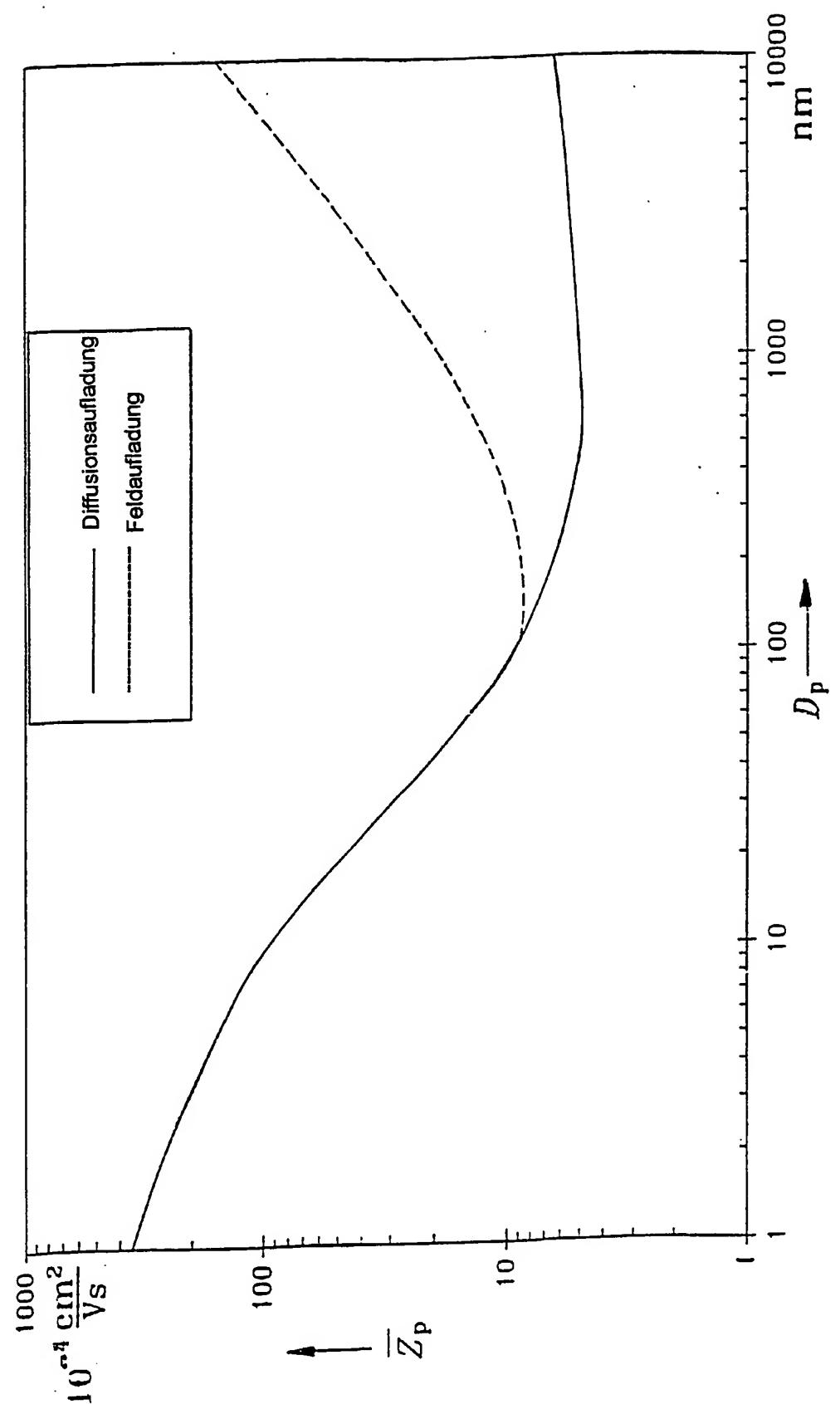
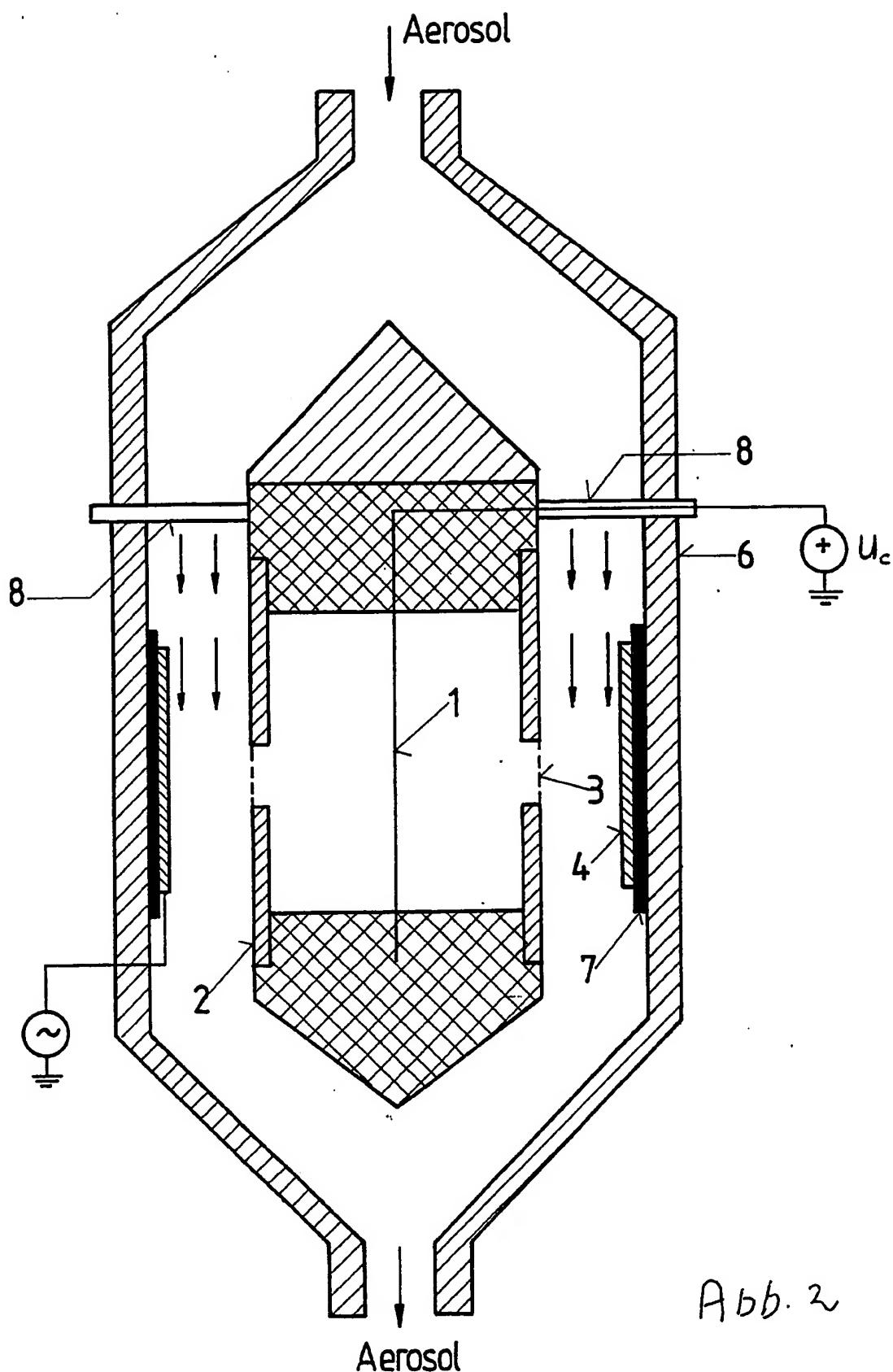


Abb. 1



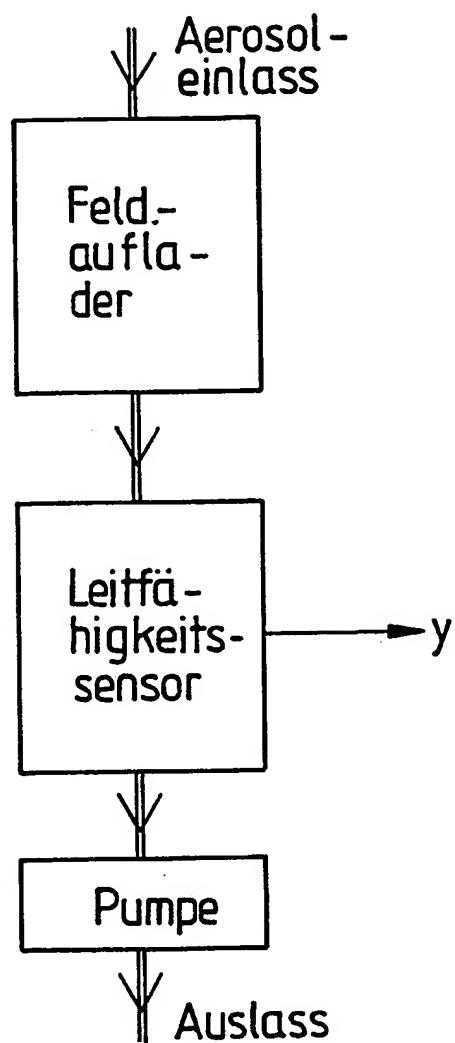


Abb. 3

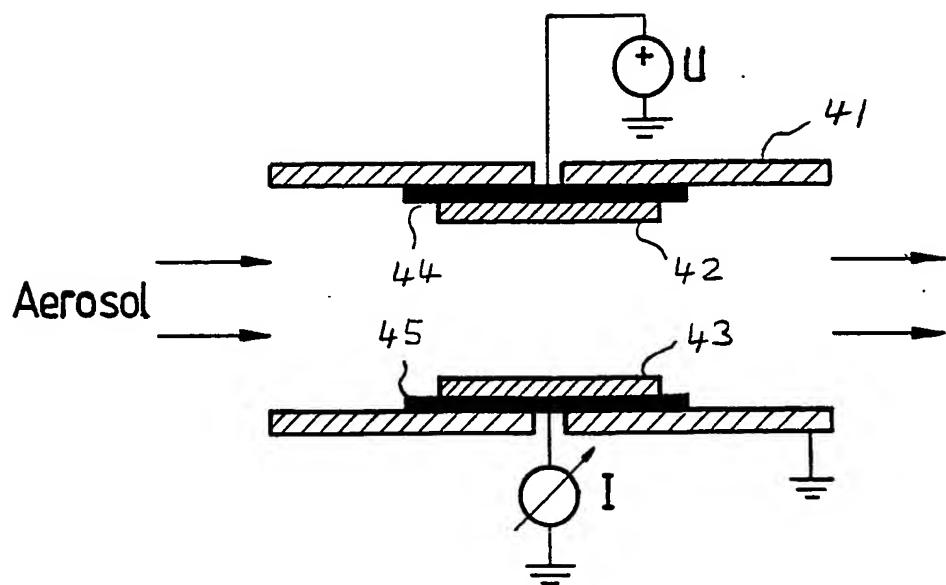


Abb. 4

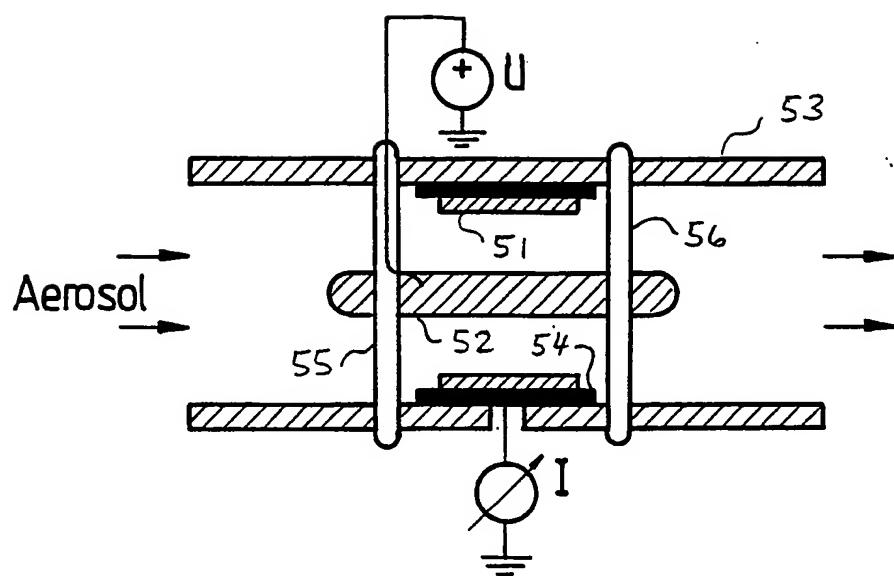


Abb. 5

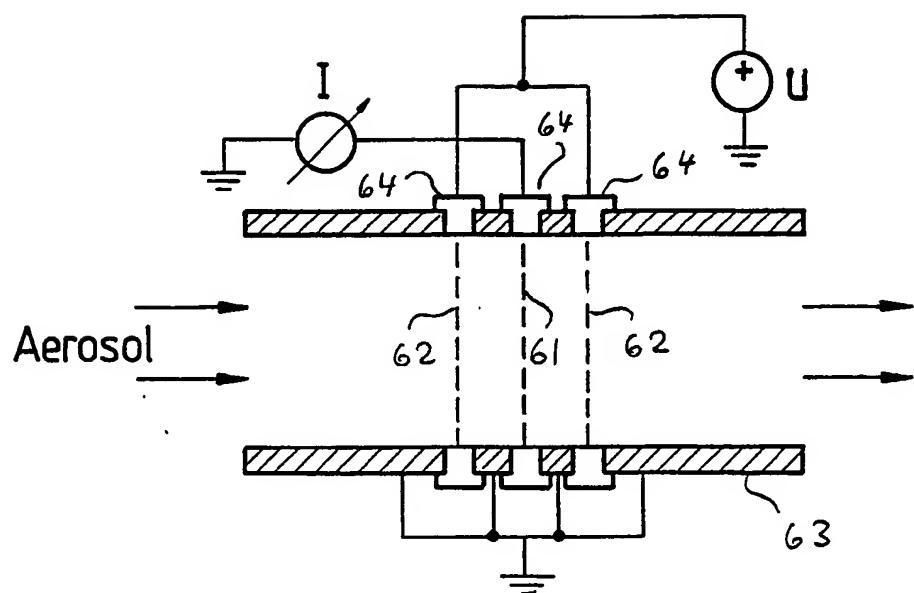


Abb. 6

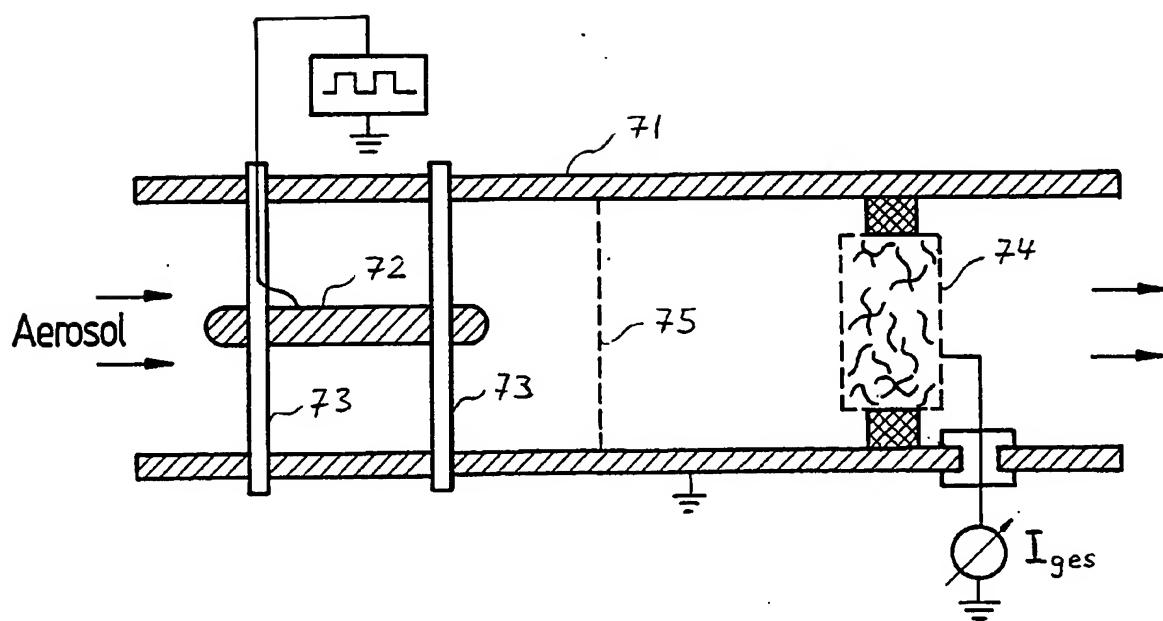


Abb. 7

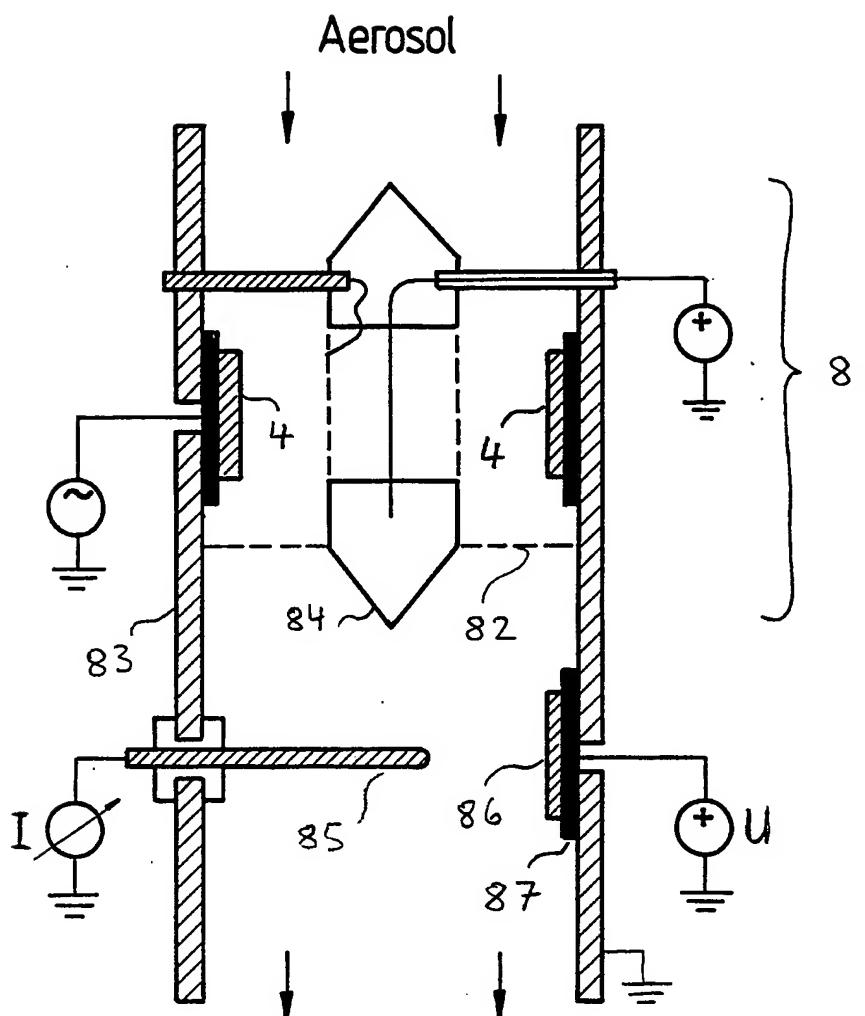


Abb. 8